

钻井泥浆侵入模拟

王海涛 1

1. 测井公司, 中石化胜利石油工程有限公司测井公司, 山东, 东营

简介

地层岩石通过地层水传导电流, 当地层水的含量与其矿化度变化时, 岩石的电性就随之发生变化, 含油地层中的油气为绝缘流体, 因此具有较高的电阻率。地层中油气与地层水含量不同, 使得储层总的电阻率不同。石油测井依据该特性判断地层是否为含油气储层并确定储层中的油气储量, 即电阻率测井。然而在现场钻井时, 泥浆滤液会在压力差的作用下侵入到渗透性地层, 使得油水含量和地层水矿化度发生改变, 从而改变岩石电阻率, 电阻率测井测量的电阻率数值偏离原始地层电阻率。因此, 在测井解释评价中, 利用电阻率测井准确识别储层流体类型造成困难。近年来, 国内外学者讨论和研究了泥浆滤液侵入与电测井响应的影响关系, 大部分泥浆侵入研究成果还没有把侵入特征与测井响应特征有机结合, 同时现在勘探研究区域为低孔低渗储层, 盐水泥浆侵入现象明显, 因此目前测井解释评价亟需开展盐水泥浆侵入对低孔低渗储层评价以及电阻率测井响应的攻关。

实验设置

在泥浆侵入过程, 采用四层水平层状地层模型(图 1)。每层地层模型具有不同的孔隙度、渗透率和相对渗透率等物性条件(表 1)。研究不同物性条件下泥浆侵入造成饱和度、浓度(矿化度)、岩石电阻率以及电阻率测井曲线的变化。

表 1、泥浆侵入数值模拟的参数。

变量	数值	单位	变量	数值	单位
地层水密度	1000	Kg/m ³	流体扩散系数	10 ⁻⁹	m ² /s
原油密度	850	Kg/m ³	流体弥散系数	10 ⁻¹⁰	m ² /s
地层水黏度	0.001	Pa.s	相对介电常数	10 ⁻⁵	1
原油黏度	0.003	Pa.s	地层温度	105	°C
地层水浓度	0.2	mol/m ³	岩性系数, a	1.0	1
泥浆滤液浓度	0.8	mol/m ³	饱和度系数, b	1.0	1
井眼压力	15	Mpa	孔隙度指数, m	2.0	1
地层压力	12	Mpa	饱和度指数, n	2.0	1

泥浆侵入遵循达西定律。泥浆滤液的矿化度与地层水的矿化度不同, 对流和扩散作用造成地层流体矿化度的变化。根据侵入后地层流体矿化度的变化, 公式(1)确定不同时刻距离井壁为 r 的地层流体的电阻率 $R_w(r, t)$:

$$R_w(r, t) = (0.0123 + \frac{3647.5}{C_w^{0.9550}(r, t)}) \frac{82}{1.8T + 39}, (1)$$

式中, $C_w(r, t)$ 为侵入时间为 t, 距离井壁为 r 的地层水矿化度; T 为地层温度。

根据泥浆侵入过程中的地层含水饱和度和地层水电阻率的变化, 应用阿尔奇公式(2)确定不同侵入时刻距离井壁 r 的地层电阻率 $R_t(r, t)$:

$$R_t(r, t) = \frac{abR_w(r, t)}{S_w^n(r, t)\phi^m}, (2)$$

式中, $S_w(r, t)$ 为侵入时间 t 距离井壁 r 的地层含水饱和度; a 为岩性系数; b 为饱和度系数; m 为孔隙度指数; n 为饱和度指数。

为了模拟电阻率测井曲线，采用单电极供电，测量两个测量电极间的电压，利用欧姆定律尝试计算测量电极间的介质电阻率。最终，采用储层岩石电阻率分布结合径向几何因子，模拟侧向测井电阻率曲线。

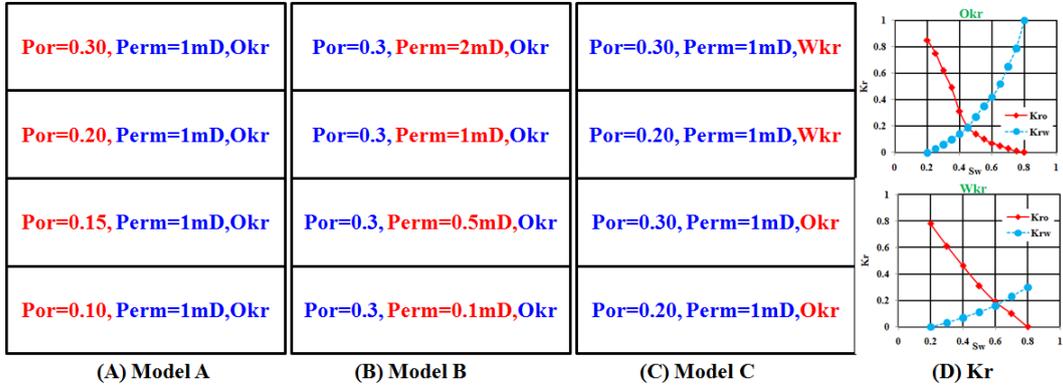


图 1、A-C 表示三种不同物性条件的地层模型，D 为相对渗透率曲线。

数值模型与控制方程

泥浆侵入采用 Porous Media and subsurface flow 模块下的 Two-Phase Darcy's Law 物理接口，模拟过程中假设地层中只有油水两相，油水两相不混溶，忽略流体和岩石的压缩性以及重力、毛管压力作用。泥浆侵入过程遵循流体渗流的质量守恒方程为：

$$\frac{\partial \phi_f \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0, \mathbf{u} = -\frac{k}{\mu} \nabla p, \quad (3)$$

$$\rho = s_1 \rho_1 + s_2 \rho_2, \frac{1}{\mu} = s_1 \frac{K_{r1}}{\mu_1} + s_2 \frac{K_{r2}}{\mu_2}$$

式中， k 为地层渗透率； K_{r1}, K_{r2} 为油、水相的相对渗透率； ρ_1, ρ_2 为油、水的密度； μ_1, μ_2 为油、水的黏度。

辅助方程：

$$s_1 + s_2 = 1, \quad (4)$$

模型初始条件为：

$$p(r, t) \Big|_{t=0} = p_0, \quad (5)$$

$$S(r, t) \Big|_{t=0} = S_{w0}$$

式中， p_0 为初始地层压力； S_{w0} 为初始地层含水饱和度； r 为地层距离井壁的距离。

模型边界条件为采用内、外边界定压条件：

$$p \Big|_{r=r_w} = p_{wf};$$

$$p \Big|_{r=r_e} = p_{we}, t > 0; \quad (6)$$

式中， r_w 为井壁； r_e 为地层边界； p_{wf} 为井底流压， p_{we} 为地层边界压力。

地层流体的对流扩散模型采用 Chemical Species Transport 模块中的 Transport of diluted species in porous media 接口实现，泥浆侵入过程中，当泥浆滤液浓度与地层水浓度存在差异时，泥浆滤液与地层水发生对流和扩散，遵循的方程为：

$$\nabla \cdot \mathbf{\Gamma}_i + \mathbf{u} \cdot \nabla c_i = R_i + S_i, \quad (7)$$

$$\mathbf{N}_i = \mathbf{\Gamma}_i + \mathbf{u} c_i$$

式中， \mathbf{N}_i 表示摩尔通量， $\text{mol} / (\text{m}^2 \text{s})$ ； $\mathbf{\Gamma}_i$ 表示浓度扩散， $\text{mol} / (\text{m}^2 \text{s})$ ； \mathbf{u} 为流体对流速度， m/s ； R_i 表示通量的产生或消耗； S_i 表示流体浓度的变化。

对流速度等于达西流体速度实现多物理场耦合。

模型初始条件:

$$\begin{aligned} c2(r,t)|_{t=0} &= c_{20} \\ c3(r,t)|_{t=0} &= c_{30} \end{aligned}, (8)$$

式中, C2, C3 对应地层水和泥浆滤液浓度, 单位 mol/m³; C₂₀, C₃₀ 对应地层水与泥浆滤液初始时刻浓度, mol/m³。

模型边界采用入口边界指定泥浆滤液浓度, 出口边界无浓度扩散条件:

$$\begin{aligned} c2|_{r \leq r_w} &= c_{0,2}; \\ c3|_{r \leq r_w} &= c_{0,3}; \\ -\mathbf{n} \cdot D_i \nabla c_i|_{r=r_e} &= 0, t > 0; \end{aligned}, (9)$$

通过流体浓度、地层孔隙度、饱和度依据公式(1)和阿尔奇公式(2)获取地层岩石电阻率, 实现电阻率与泥浆侵入多物理场耦合。

通过 AC/DC 模块中的 Electric Currents 接口研究地层电阻率, 电流和电压分布遵循欧姆定律:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = Q_j; \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \mathbf{J}_e; \mathbf{E} = -\nabla V, (10)$$

式中, \mathbf{J} 为电流密度, A/m²; \mathbf{E} 为电场强度, v/m; V 为电位, v; \mathbf{J}_e 为介电电流密度, A/m²; σ 为介质电导率, S/m; Q_j 点电荷堆体积密度, C/m³。

模型初始条件:

$$\begin{aligned} V(r,t)|_{t=0} &= 0; \\ V(A,t)|_{t=0} &= 4; \end{aligned}, (11)$$

式中, A 表示供电电极。

模型边界采用固定电势边界条件:

$$V(r,t)|_{boundary} = 0, (12)$$

基于侧向测井径向微分几何因子计算探测深度内的岩石电阻率为:

$$Ra(t) = \sum_{i=1}^n Rt(r_i, t)G(r_i), (13)$$

式中, Ra 为侧向电阻率, $\Omega \cdot m$; Rt 泥浆侵入时间 t 后距离井壁 r 处电阻率, $\Omega \cdot m$; G(r_i)为距离井壁 r 处的径向微分几何因子。

仿真结果

地层模型如图 1 所示, 表 1 给定模拟过程中多孔介质以及流体参数, 图 2-4 给定模拟结果, 从图中可以看出, 在相同的侵入时间内, 随着地层渗透率增加, 地层孔隙度降低, 相对渗透率增大, 泥浆侵入深度增加; 随侵入时间增大, 泥浆侵入深度增大, 造成含油饱和度降低, 地层水浓度(矿化度)增大, 井周岩石电阻率减小, 从而导致测井电阻率曲线降低。

为了验证数值模拟方法的正确性, 依据岩心分析资料获取实际地层的深度位置、孔隙度和渗透率, 依据钻井地质报告获取泥浆浸泡时间(表 2), 利用地层水分析资料获取地层流体的密度、黏度和浓度, 依据岩电实验数据获取阿尔奇参数(表 3), 进行模型构建和泥浆侵入模拟。由于实际钻井过程中, 泥饼形成后渗透率降低, 因此, 模拟过程中渗透率为原来的 0.001。图 5 显示不同侵入时间后含油饱和度、地层流体浓度、岩石电阻率以及测井电阻率曲线变化。不同物性条件下, 在相同侵入时间内, 泥浆侵入程度不同; 随侵入时间增大, 侵入深度增加。图 6 对比侵入规定时间后的模拟电阻率与测井电阻率曲线, 从图中第三道可以看出模拟曲线与测井曲线吻合, 表明模拟方法的正确性。

结论

通过模拟结果可以得到:

在相同侵入时间内，随地层渗透率增加，孔隙度降低，相对渗透率增大，泥浆侵入深度增大，含油饱和度降低；

随着侵入时间增加，井周地层水矿化度、含水饱和度、地层电阻率的侵入剖面边缘、电阻率测井曲线均发生明显变化；

岩心和流体分析获取地层物性与流体参数建立实际地层模型，模拟泥浆侵入，计算的电阻率与测井曲线吻合，表明模拟方法的正确性与可行性，为下一步储层电阻率校正，提高测井地层评价的准确性奠定基础。

参考文献

1. Archie G E. The Electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics[J]. Transactions of the AIME, 146(1):54-62 (1942).
2. Alpak F.O., Habashy T.M., Torres-Verdin C., Numerical simulation of mud-filtrate invasion in horizontal wells and sensitivity analysis of array induction tools[J]. Petrophysics, 44(6):396-411 (2003).
3. Wu J., Torres-Verdin C., Sepheoori K., et al., Numerical simulation of mud-filtrate invasion in deviated wells[J]. SPE reservoir Evaluation & Engineering, 7(2):143-154, (2004).
4. Jiang, Y.J, Sun, J.M. et al., Mud invasion and array laterolog responses in low permeability gas reservoir: a case study[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 14(3): 456-465, (2017).

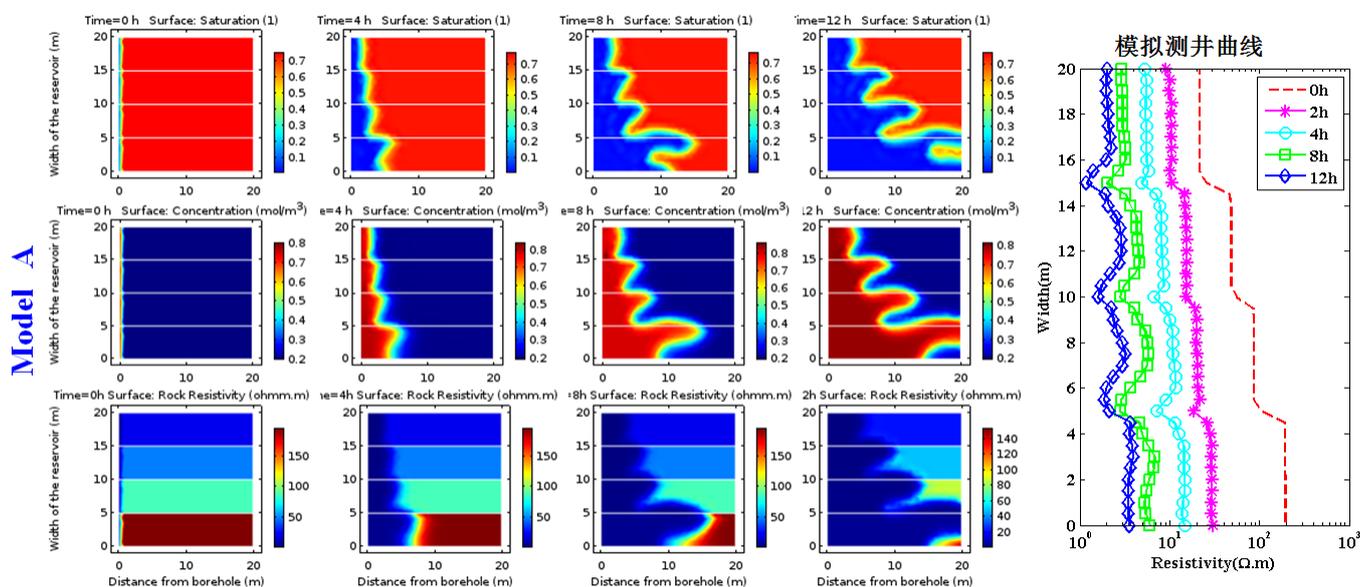


图 2、三种不同孔隙度地层模型在泥浆侵入后的含油饱和度、地层水浓度、岩石电阻率与模拟测井曲线的分布。

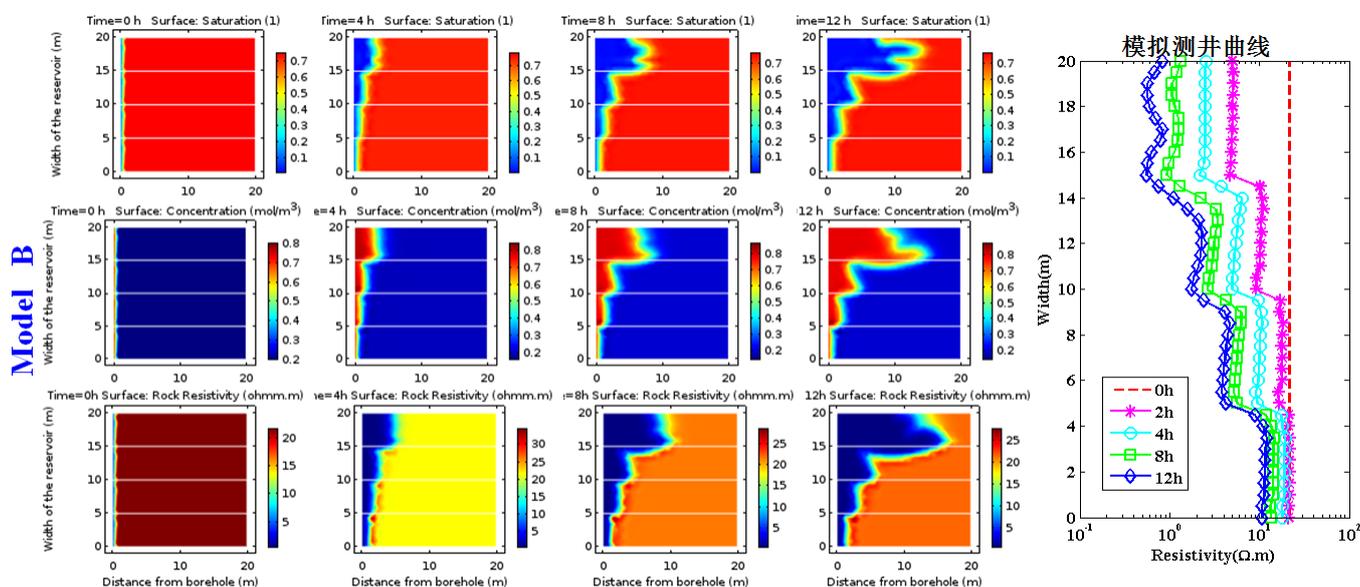


图 3、三种不同渗透率地层模型在泥浆侵入后的含油饱和度、地层水浓度、岩石电阻率与模拟测井曲线的分布。

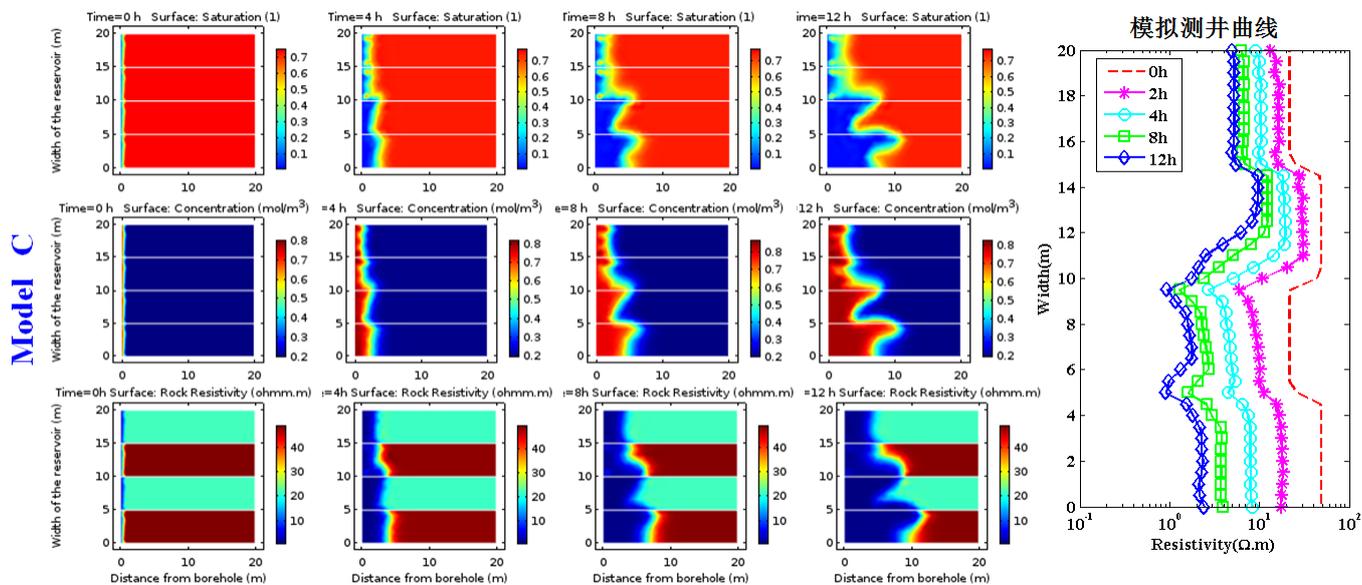


图 4、三种不同相对渗透率地层模型在泥浆侵入后的含油饱和度、地层水浓度、岩石电阻率与模拟测井曲线的分布。

表 2、实际地层的孔隙度、渗透率与泥浆侵入时间。

NO.	Depth (m)	Por (%)	K(mD)	S _w (%)	Time (Day)	NO.	Depth (m)	Por (%)	K(mD)	S _w (%)	Time (Day)
1	3130	11.50	5.15	60.18	24	12	3141	10.04	2.83	71.74	24
2	3131	11.75	5.66	66.69	24	13	3142	10.16	2.99	71.12	24
3	3132	11.23	4.65	68.35	24	14	3143	9.89	2.65	74.43	24
4	3133	10.94	4.14	61.12	24	15	3144	10.36	3.26	80.02	24
5	3134	11.29	4.75	54.69	24	16	3145	9.93	2.70	71.15	24
6	3135	11.00	4.22	59.36	24	17	3146	8.59	1.43	81.57	24
7	3136	10.24	3.09	80.86	24	18	3147	8.57	1.41	81.27	24
8	3137	11.05	4.32	64.86	24	19	3148	9.06	1.81	65.61	24
9	3138	10.70	3.76	70.88	24	20	3149	10.42	3.34	62.70	24
10	3139	10.96	4.18	71.86	24	21	3150	9.80	2.55	70.18	24
11	3140	10.70	3.76	71.90	24						

表 3、实际地层泥浆侵入数值模拟的参数。

变量	数值	单位	变量	数值	单位
地层水密度	1000	Kg/m ³	流体扩散系数	10 ⁻⁹	m ² /s
原油密度	850	Kg/m ³	流体弥散系数	10 ⁻¹⁰	m ² /s
地层水黏度	0.001	Pa.s	相对介电常数	10 ⁻⁵	1
原油黏度	0.007	Pa.s	地层温度	125	°C
地层水浓度	0.85	mol/m ³	岩性系数, a	1.2	1
泥浆滤液浓度	1.86	mol/m ³	饱和度系数, b	1.2	1
井眼压力	21.3	Mpa	孔隙度指数, m	2.0	1
地层压力	19.3	Mpa	饱和度指数, n	2.06	1

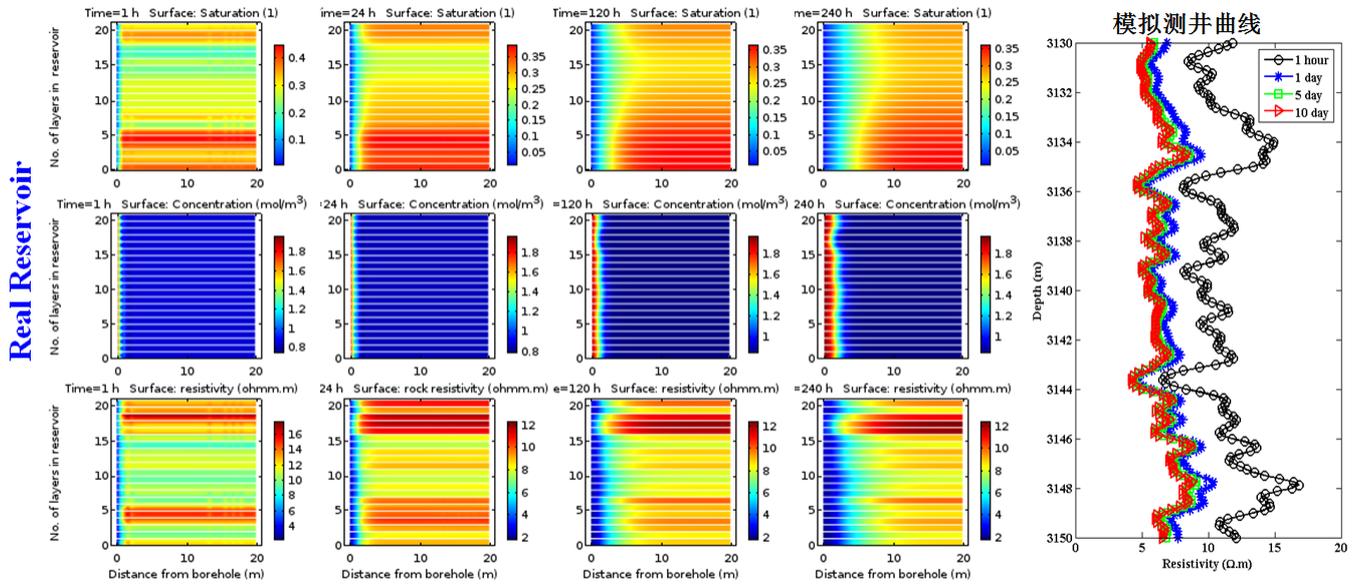


图 5、实际地层模型在泥浆侵入后的含油饱和度、地层水浓度、岩石电阻率与模拟测井曲线的分布。

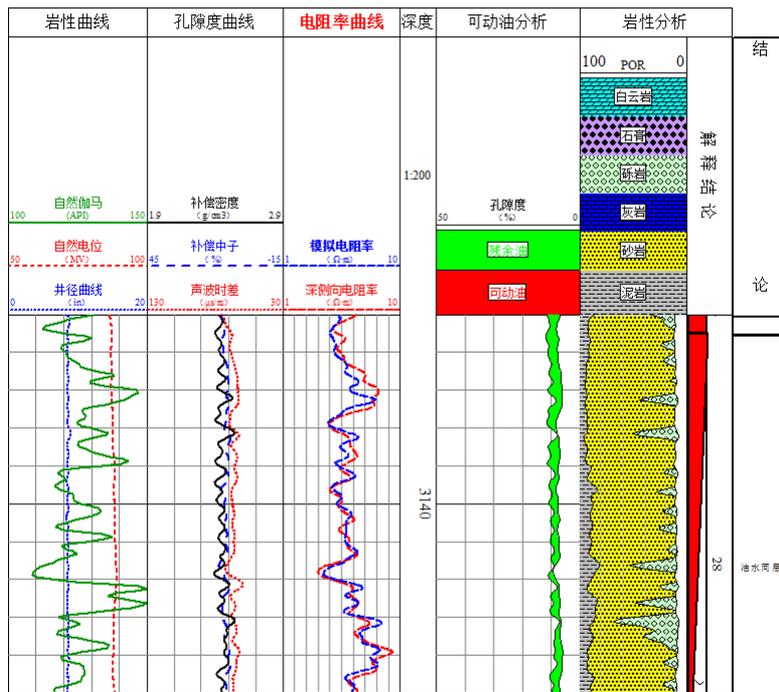


图 6、实际地层模拟电阻率与实际测井曲线对比。

致谢

感谢中石化胜利石油工程有限公司测井公司提供测井资料，感谢中国石油大学（华东）测井系提供 Comsol 软件信息，感谢 Comsol 中国提供年会。